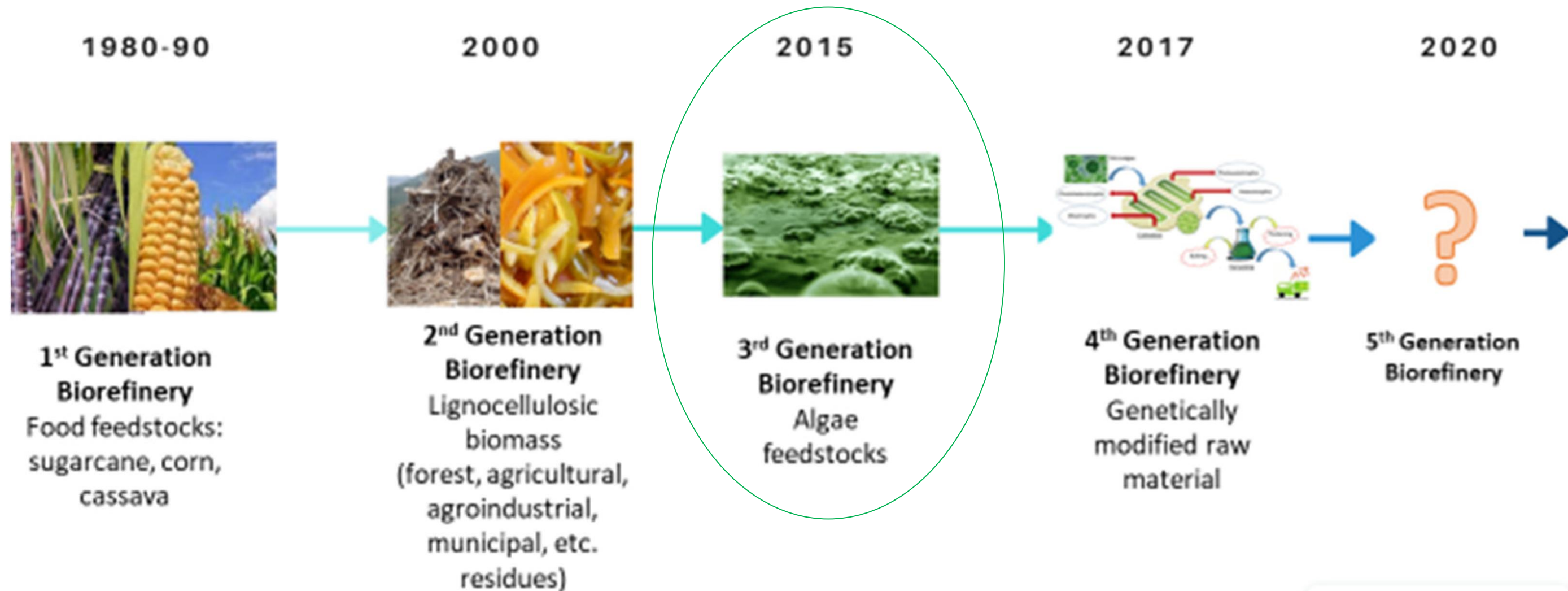


**Виробництво передового біометану з
мікроводоростей, вирощених на дигестаті
біогазових установок в Україні**

Мар'яна Гивель
Біоенергетична Асоціація України
(UABIO)

Еволюція сировини для біопалив

Біогазова галузь за останні 20 років пройшла шлях від використання переважно гною та кукурудзяного силосу — до все складніших, технологічно оптимізованих і сталих джерел сировини. Сьогодні, **окрім традиційних культур**, активно використовуються покривні та проміжні культури, лігноцелюлозні матеріали, а також з'являються нові напрямки — такі як **мікроводорості**.

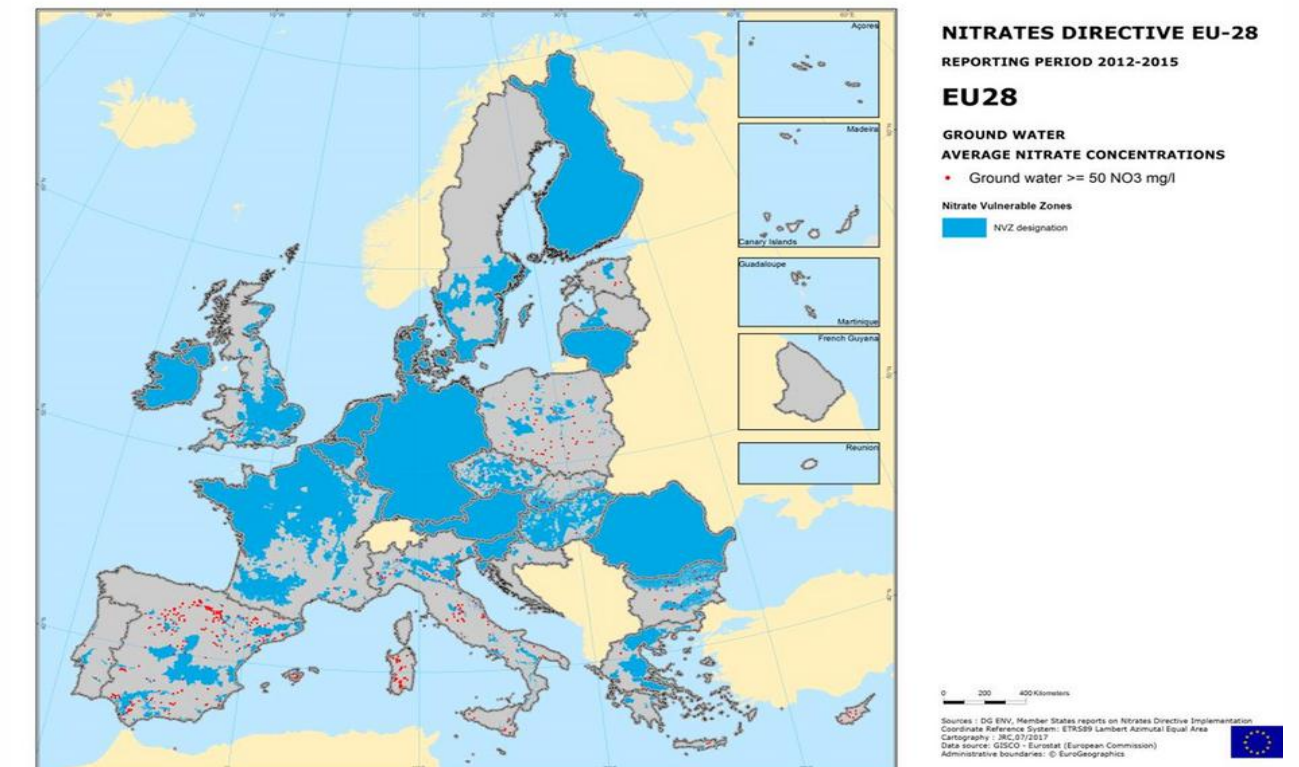


МОТИВАЦІЯ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ

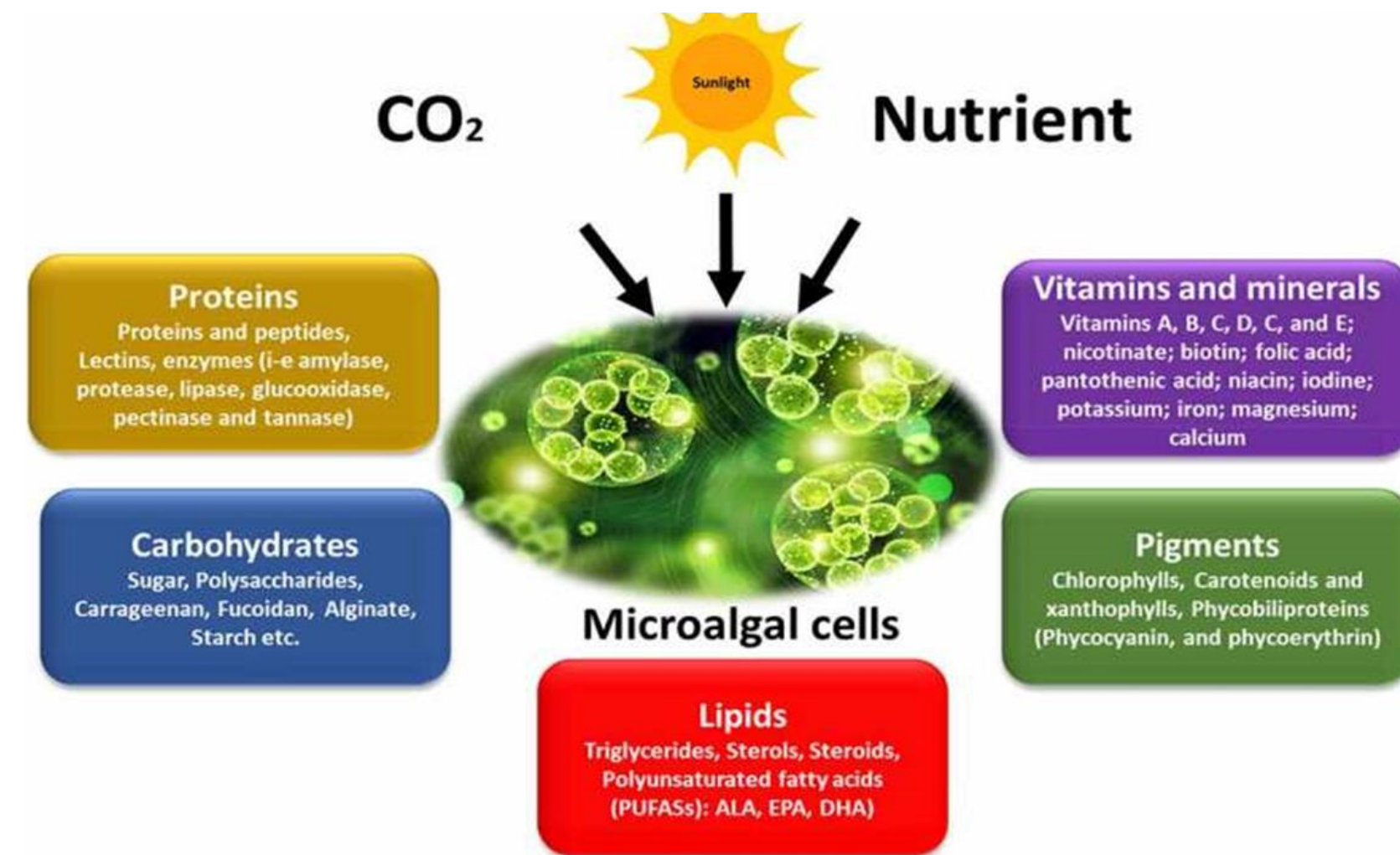
- **Директива RED II, Додаток 9, Частина А.** Сировина для виробництва біогазу для транспорту та передових біопалив, внесок якої до мінімальних часток, зазначених у першому та четвертому підпунктах статті 25(1), може вважатися подвоєним від їхньої енергетичної цінності: Водорості, якщо їх вирощують на землі у ставках або фотобіореакторах; https://lexparency.org/eu/32018L2001/ANX_IX/
- **Мікроводорості** пропонують інноваційне рішення, оскільки **здатні перетворювати надлишкові азот і фосфор із дигестату на цінну біомасу.** Це особливо актуально для регіонів із обмеженнями землекористування та вимогами Директиви ЄС щодо нітратів. Такий підхід зменшує евтрофікацію, забезпечує уловлювання CO₂ та сприяє сталому перетворенню поживних речовин.



Renewable Energy Directive EU



Переваги використання мікроводоростей для виробництва біометану

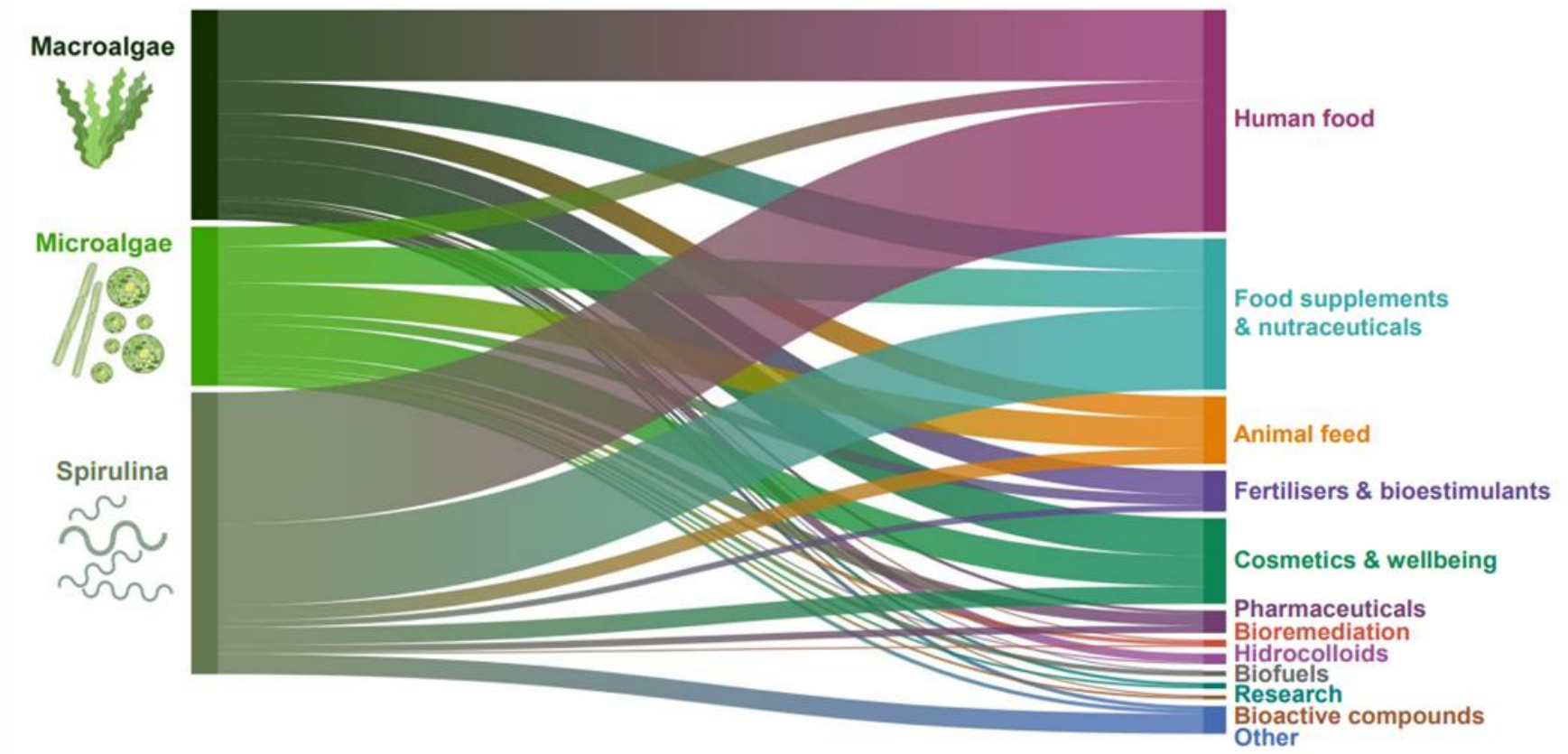


Тренди переробки мікрободоростей

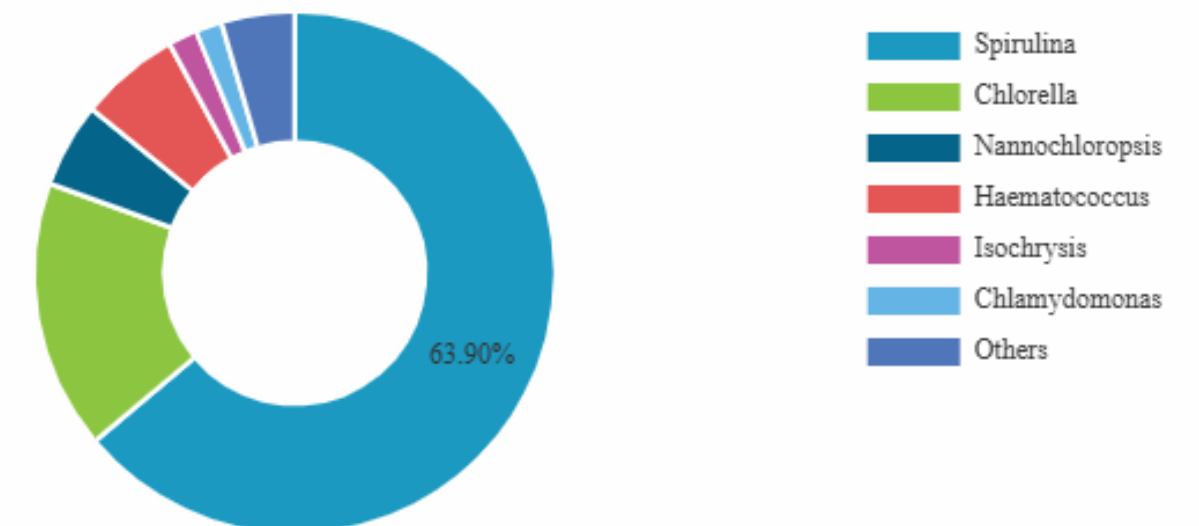
Основні напрями застосування мікрободоростей у 2022 році харчові продукти та добавки — 23%, кормові продукти — 19%, косметика — 19%, фармацевтика — 8%, добрива та біостимулятори — 7%.

Разом ці напрями становлять 76% загального виробництва в ЄС.

Обмежене використання мікрободоростей для енергетичних цілей зумовлене: високою собівартістю, енергоємними процесами, проблемами масштабування, браком політичної та регуляторної підтримки. Водночас культивування мікрободоростей на дигестаті біометанових заводів в Україні може суттєво знизити витрати та підвищити ефективність



<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6af868a1-4071-11ed-92ed-01aa75ed71a1/language-en>



www.fortunebusinessinsights.com

Global microalgae market by microalgae type in 2024

МІКРО- ВОДОРСТІ В СВІТІ ТА УКРАЇНІ

Україна

Ранні етапи розвитку, сфера застосування — харчові добавки. Ключові промислові виробники (спіруліна у порошку, таблетках та функціональних продуктах):

ТОВ «Food Factory» (бренд Spirulinka): виробнича потужність — 12 тонн їстівної спіруліни на місяць.

«Aqvatic Farm» (Дніпропетровська область): виробнича потужність — 1 тонна на місяць, відкрита ставкова система.

Інші учасники ринку (МСП): пропонують продукцію на основі спіруліни та хлорели.

Microalgae based Products Market

Microalgae based Products Market, by Region in 2023(%)



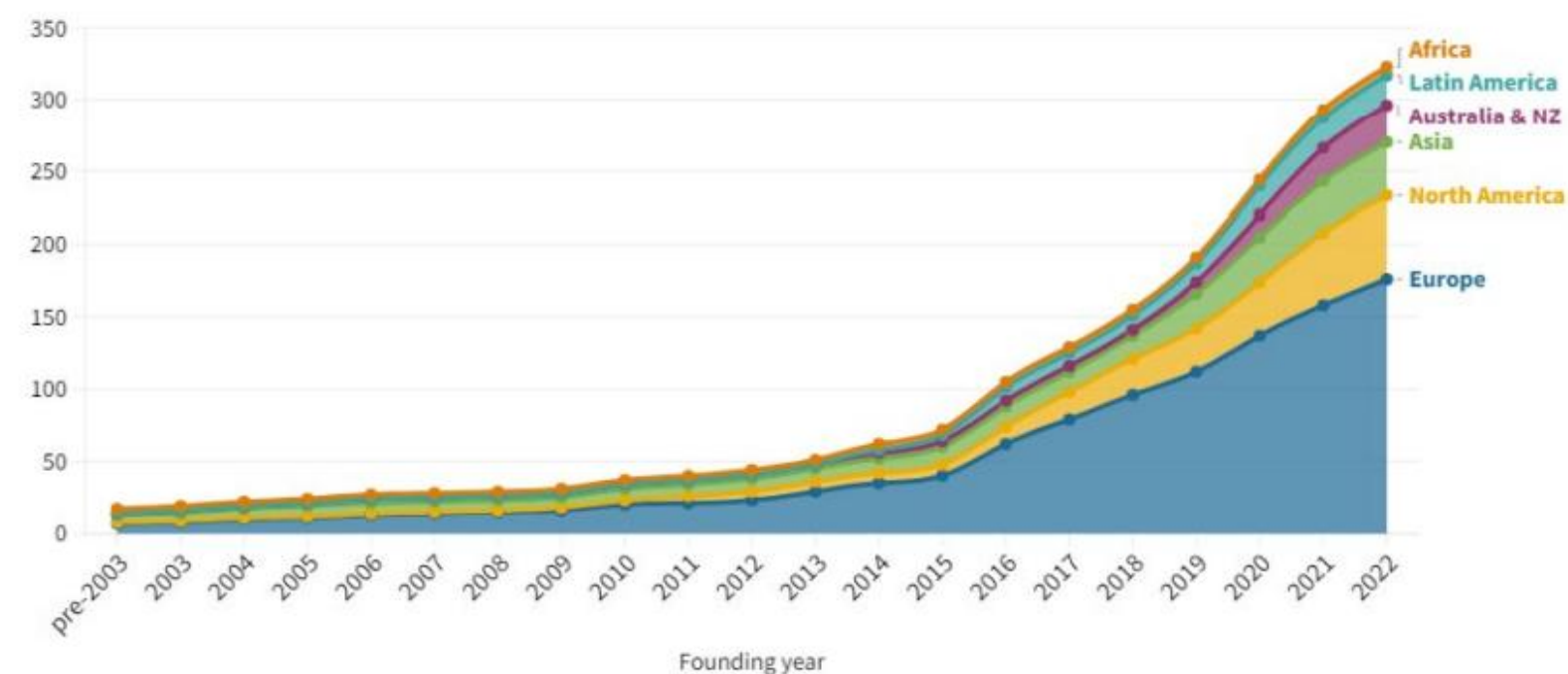
Market Size

Year	Market Size (USD Billion)
2023	USD 13.25
2030	USD 23.01

Market Size in Billion

<https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-microalgae-based-products-market/63970/>

Figure 16: Global development of algae start-ups by founding year, 2003 - 2022



Світові тенденції

Північноамериканський регіон у 2023 році очолив глобальний ринок продукції на основі мікроводоростей із найбільшою часткою — 32%. Очікується, що регіон зростатиме зі середньорічним темпом (CAGR) 8,6% протягом прогнозованого періоду та збереже лідерство до 2030 року. Основними чинниками зростання визначаються зростання попиту на натуральні харчові барвники, підвищення популярності нутрицевтиків і дієтичних добавок, а також інвестиції в технології.

Інтеграція на існуючих біогазових установах

- Ринкова вартість високотехнологічних продуктів із мікроводоростей (нутрицевтики, корми, біоматеріали) значно перевищує вартість біопалив, що робить енергетичні застосування менш привабливими з комерційної точки зору.
- Водночас інтеграція у існуючі ланцюги переробних заводів з виробництвом різних цільових продуктів з мікро- водоростей (біопалива, корми, біодобавки, добрива тощо) утилізуючи побічні продукти такі як CO₂, тепло та стічні води очікувано принесуть позитивний вплив на економіку та екологію виробництва як об'єкт циркулярної економіки.

Умови, необхідні для росту фотоавтотрофних мікроводоростей	Наявність на біогазових установах
Необхідне освітлення (сонячне або штучне як, наприклад, LED)	-/+ тільки літом
температура (15-30°C)	+
вода	+
вуглекислий газ (CO ₂)	+
мінеральні нутрієнти (N, P, K) Орієнтовно 1,8 т CO ₂ , 70 кг N, 10 кг P і 8 кг K потрібно для вирощування 1 т біомаси мікроводоростей	+
-	

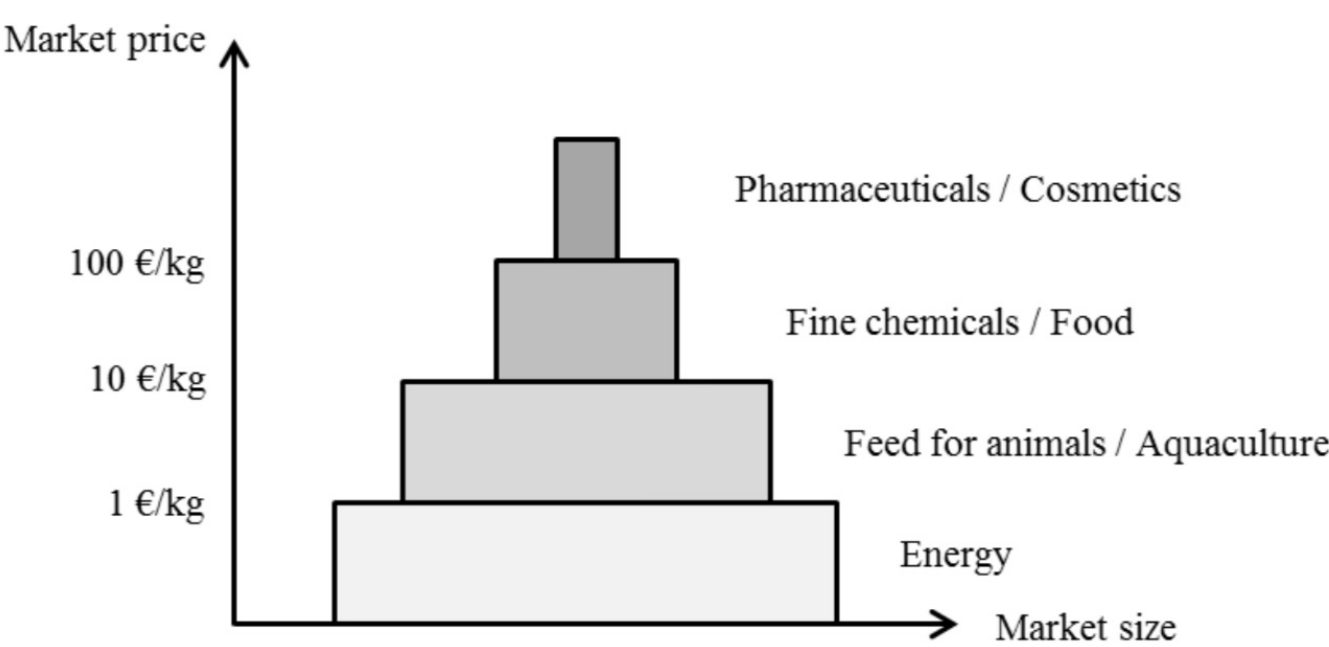


Figure 1: Markets and prices of microalgae as feedstock

Енергетична та економічна ефективність

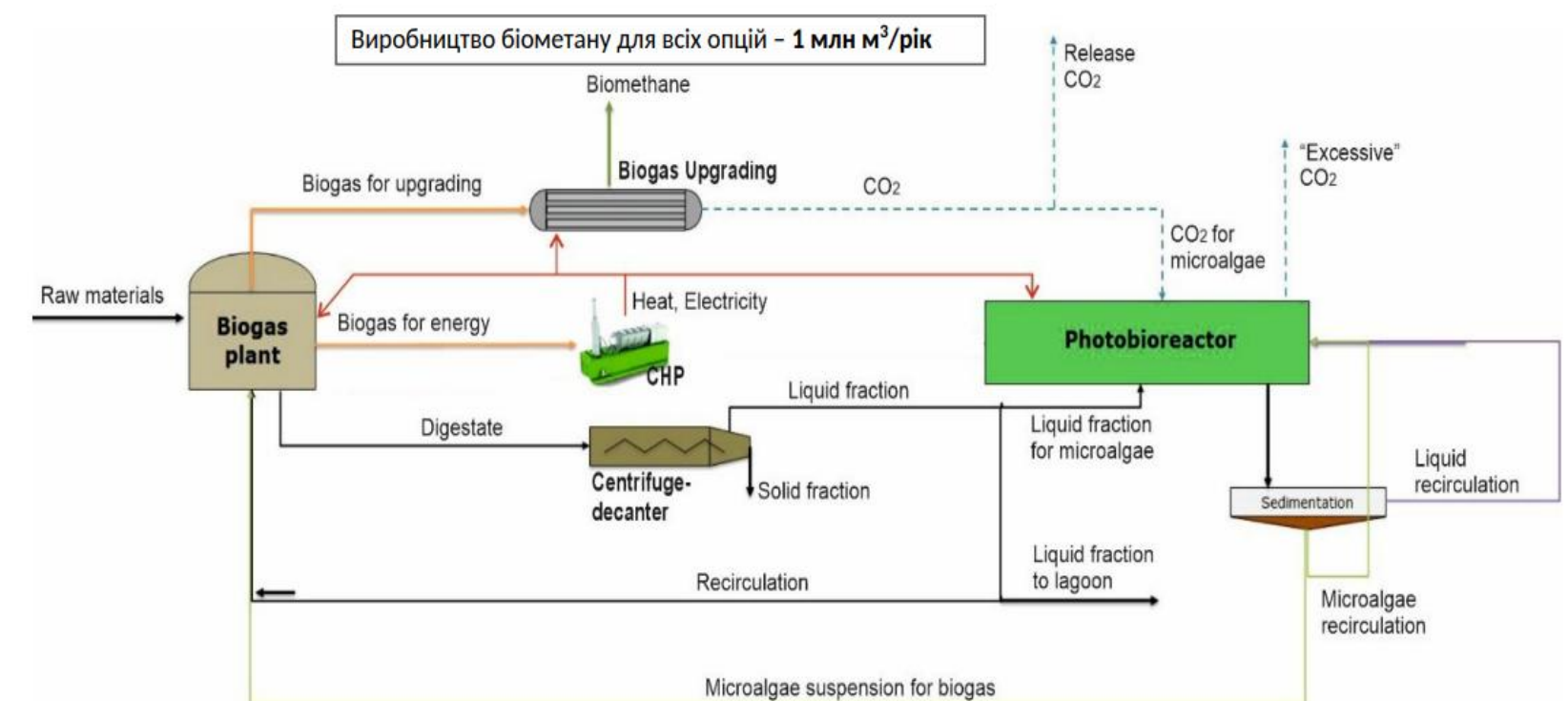
Для досягнення економічно доцільного виробництва передового біометану з водоростей вартість збору мікроводоростей має становити менше ніж 0,2 євро/кг сухої речовини (СР) водоростей

Енергетично доцільне вирощування мікроводоростей для виробництва біометану можливе **за умови їх вирощування в теплу половину року без застосування штучного освітлення** за умови високої базової продуктивності вирощування (5 г/л/добу і вище).

Основні резерви зниження собівартості :

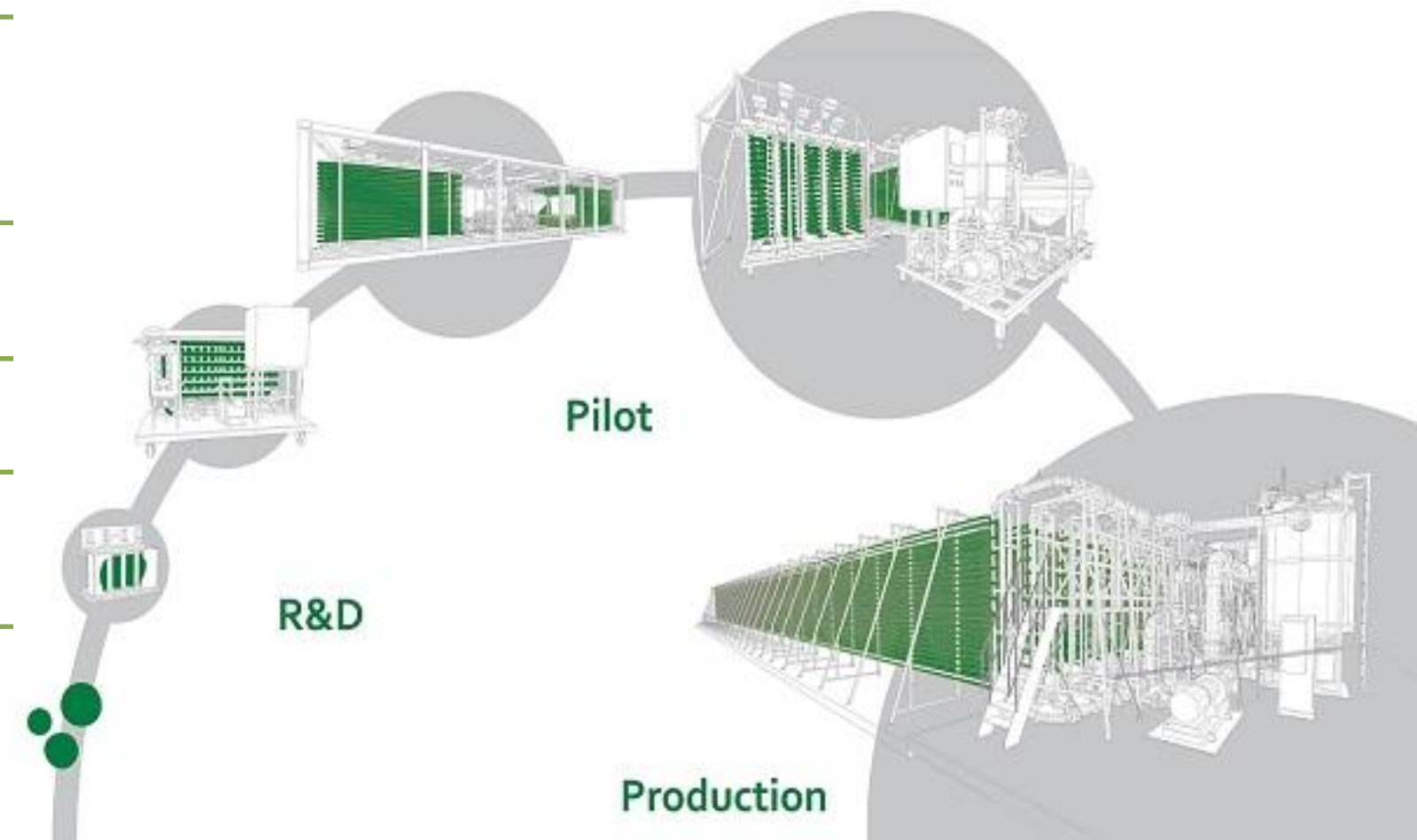
- зменшення CAPEX (спрощення конструкцій теплиць),
- підвищення продуктивності біореакторів,
- спільне опалення кількох теплиць, повторне використання тепла
- максимальне використання природного освітлення, та енергоефективного штучного освітлення

Загальна схема інтеграції вирощування мікроводоростей та виробництва біогазу/біометану



Фактори що впливають на вихід біомаси мікроводоростей

1. Підбір виду водорості або їх комбінації
2. Режими культивування (фотоавтотрофний, міксотрофія, гетеротрофний)
3. Типи систем культивування, закр/відкрита, тип ФБР
4. Хімічний склад субстрату для вирощування
5. Освітлення: колір, довжина хвилі комбінації режимів та інш.
6. Параметри технологічного процесу: нутрієнти, подача CO₂, біологічне забруднення, температура, pH та інш.
7. Інгібітори процесу
8. Поєднання ефективних правильних технологічних режимів - змішування, подачі газів та біомаси, стерилізації, підтримки технологічних параметрів тощо.



Системи для вирощування мікробіодоростей

ФБР	Переваги	Недоліки	Продуктивність біомаси, г/(л·добу)
Відкриті ставки	• Економічність • Легке очищення • Низьке енергоспоживання • Легко масштабуються • Низькі витрати на обслуговування	• Складно контролювати параметри • Низька продуктивність біомаси • Можливість контамінації • Потребує великої площі • Неефективне змішування	0,03-0,2
Вертикальні ФБР (аерліфтні та колонні)	• Відмінна продуктивність біомаси • Висока ефективність фотосинтезу • Обмеження фотоінгібіції та фотоокислення • Невелика площа для будівництва • Підходять для вирощування на відкритому повітрі • Низький ризик контамінації • Низьке енергоспоживання • Невисока вартість, компактні та легкі в обслуговуванні	• Можливий механічний стрес клітин • Низьке освітлення та мала площа освітлення • Схильність до обростання стінок реактора	0,5-10
Горизонтальні трубчасті ФБР	• Велика освітлювана площа • Підходять для розміщення на відкритому повітрі • Хороша продуктивність • Відносно недорогі • Масштабовані • Легкий контроль • Однорідне змішування • Добрий контроль температури	• рН-градієнт • Втрати • Обростання стінок • Потребує значної площі • Гідродинамічний стрес • Можливий низький газообмін	0,35-1,5
Плоскі ФБР	• Максимальне сонячне освітлення • Високе співвідношення площі до об'єму • Підходять для відкритого культивування • Висока продуктивність біомаси • Добре розподілене освітлення • Відносно низька вартість • Легко будувати, очищати та обслуговувати • Висока ефективність фотосинтезу • Низька концентрація розчиненого кисню	• Складність масштабування • Складність культивації • Регулювання температури • Можливе обростання • Можливий гідродинамічний стрес клітин	1,5 -28

В ЄС мікробіодорості вирощують використовуючи :
Фотобіореактори 71%, відкриті ставки 19%, ферментери 10%.



[Raul Muñoz & Cristina Gonzalez-Fernandez. Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts \(Enhanced Edition\) From Feedstock Cultivation to End-Products. United Kingdom: Elsevier Science, 2017. P. 540](#)
[\(PDF\) Combined effects of Light Intensity, Light-Path and Culture Density on Output Rate of Spirulina platensis \(Cyanobacteria\)](#)

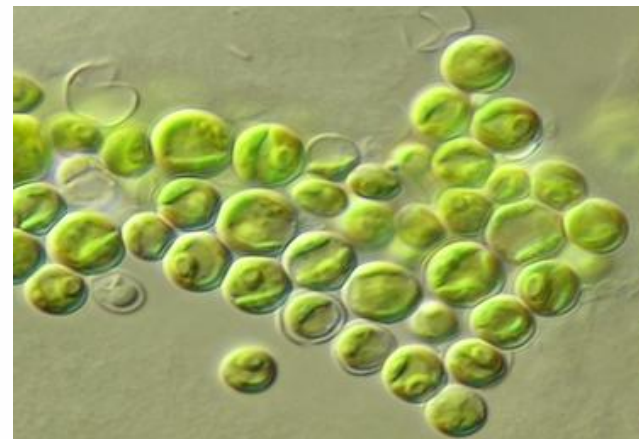
МІКРОВОДОРОСТІ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ

Штами	Питомий вихід біогазу [л/кг ОСР]	Питомий вихід CH ₄ [л/кг ОСР]	CH ₄ вміст [%]
Chlorella kessleri	335 ± 8	218	65
Chlorella vulgaris	-	310 – 350	68 – 75
Spirulina	500- 556	320 – 424	76.3
Euglena gracilis	485 ± 3	325	67
Scenedesmus obliquus	287 ± 10	178	62
Chlamydomonas rein.	587 ± 9	387	66

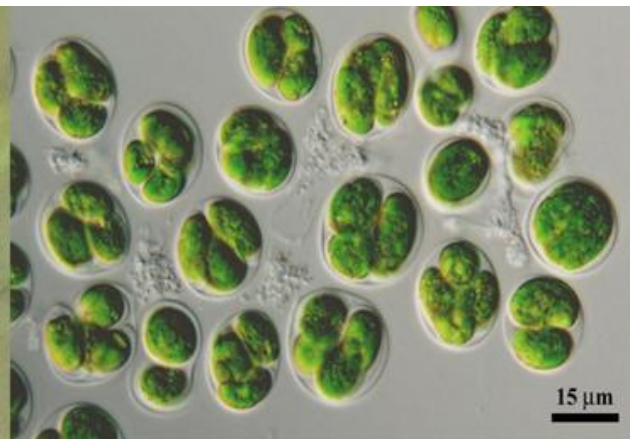
Оптимальним видом мікроводоростей для виробництва біометану є такі які мають :

- тонку клітинну стінку або її відсутність ;
- великі клітини;
- високу швидкість росту в нестерильних середовищах;
- високу питому стійкість до природних забруднень;
- толейрантність до високих концентрацій амонію та аміаку;
- оптимальний хімічний склад та високий питомий вихід біометану;

<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/02/IEA-Bioenergy-Algae-report-update-Final-template-20170131.pdf>



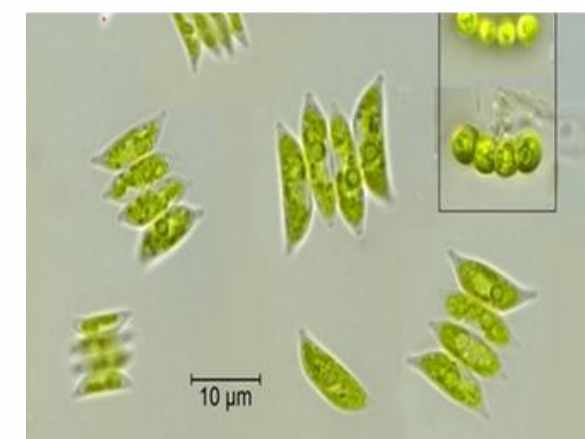
Chlorella v.
5-10 µm



Chlamydomonas reinhardtii
14-22 µm



Spirulina
< 100 µm



Scenedesmus
3-78 x 2-10 µm

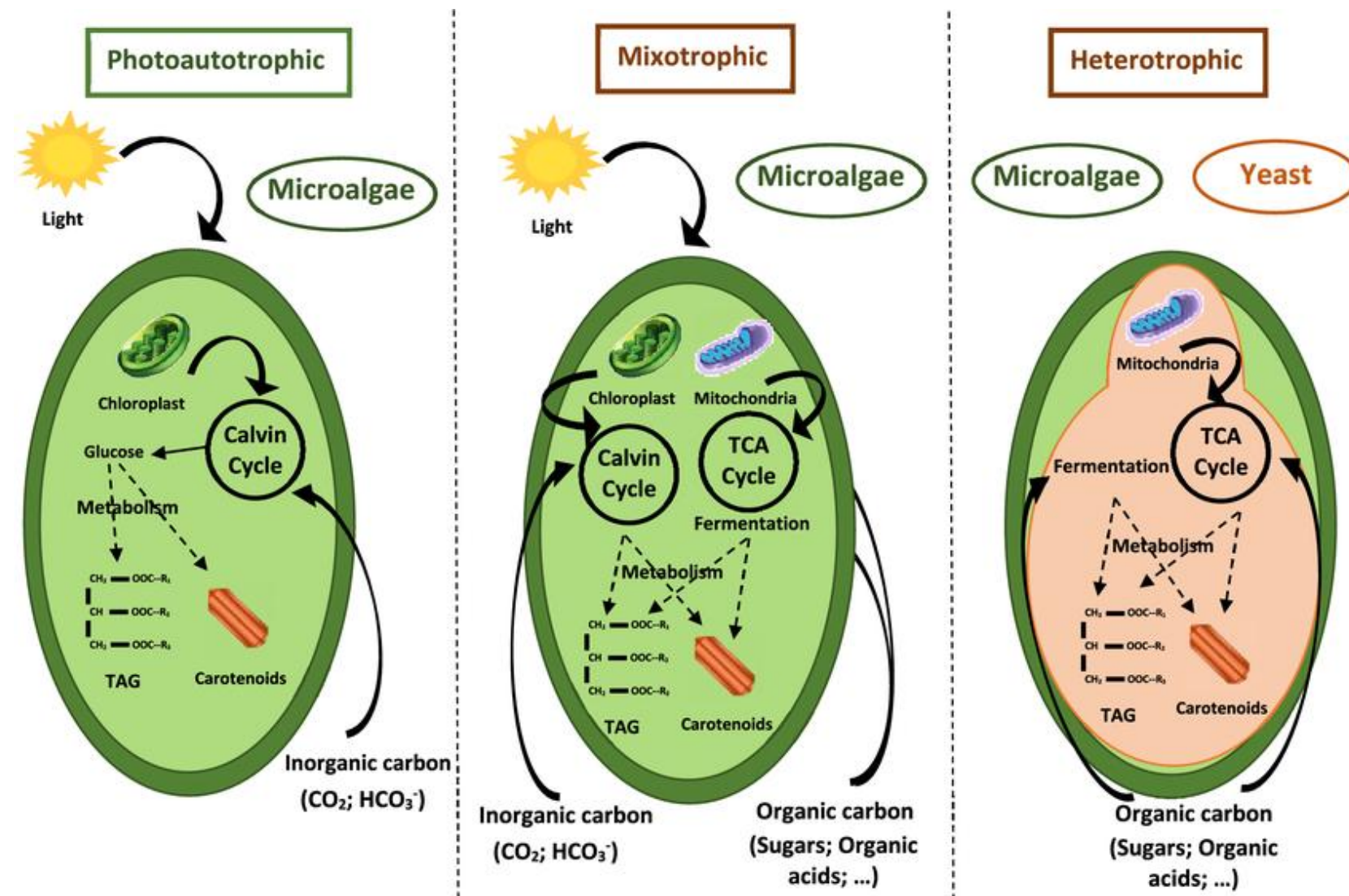


Euglena sp.
length 70 µm

Режими культивування

Як і більшість наземних рослин, мікроводорості здійснюють фотосинтез і є фотоавтотрофами.

У той же час деякі види мікроводоростей також є гетеротрофними, використовуючи органічні сполуки в середовищі росту як джерела вуглецю та енергії; тому їм не потрібне світло як джерело енергії.



- **Фотоавтотрофний** – перетворення неорганічного вуглецю та світлової енергії в цукор та клітинні компоненти МВ.
- **Гетеротрофний** ріст є аеробним процесом, коли асиміляція органічних субстратів генерує енергію шляхом окисного фосфорилування, що супроводжується споживанням кисню як кінцевого акцептора електронів.
- **Міксотрофне** культивування — це спосіб росту, при якому мікроводорості одночасно використовують джерела неорганічного CO_2 та органічного вуглецю в присутності світла тому фотоавтотрофія та гетеротрофія відбуваються одночасно.
- **Гетеротрофне та/або міксотрофне** вирощування вважається основним шляхом до інноваційних підходів. Введення 1 г л глюкози у середовище культивування відповідає уловленню енергії 10 днів сонячного опромінення МВ.

Використання дигестату як середовища для вирощування мікроводоростей

Фактори дигестату що негативно вплинуть на ріст біомаси мікроводоростей:

1. Каламутність вміст завислих речовин

Підвищена каламутність пригнічує утворення мікроводоростей. У мікроводоростей порушується процес фотосинтезу.

2. Концентрація амонію та аміаку

Інгібуюча дія аміаку залежить від виду мікроводоростей. Загальний амонійний азот, що перевищує 100-500 мг/л, викликає зниження росту клітин водоростей. Основною причиною є наявність частки вільного аміаку (NH_3) в дигестаті, який може проходити через клітинну мембрану мікроорганізмів, розривати та лізувати клітини (Akizuki et al. [2019](#)). В дигестаті (1000–3000 мг/л).

3. Недостатня кількість фосфору і нутрієнтів

Співвідношення азот/фосфор було оптимізовано для росту мікроводоростей на рівні 7.

4. Наявність патогенів, сторонньої мікрофлори

Шляхи вирішення



1. Механічна обробка - фільтрування, розведення водою



2. Розведення водою, біологічна стадія видалення аміаку, передбачити стадію вилучення аміаку.



3. Додавання нутрієнтів



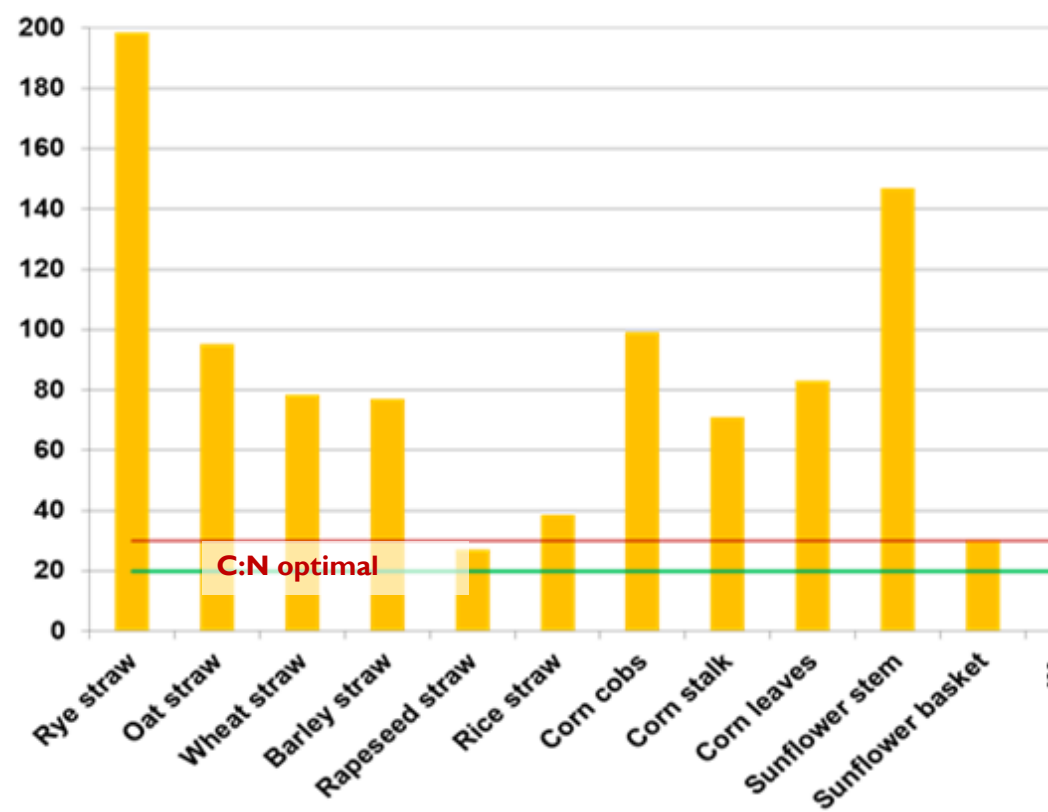
4. Попередня обробка

ПАРАМЕТРИ СУМІШІ: СУСПЕНЗІЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ
ВИРОЩЕНИХ НА ДИГЕСТАТІ БГУ + СОЛОМА

Показник	Солома	РФД з мікро- водоростями	Мікс (1:8)
CP	80	1	9,8
C/N	70	3-9	19,8

**C:N –
взаємодоповнюваність
агро сировини**

Переважає більшість
потенціалу біометану в
Україні — 69% походить з
покривних культур та
сільськогосподарських
відходів, які мають високе
співвідношення C/N.



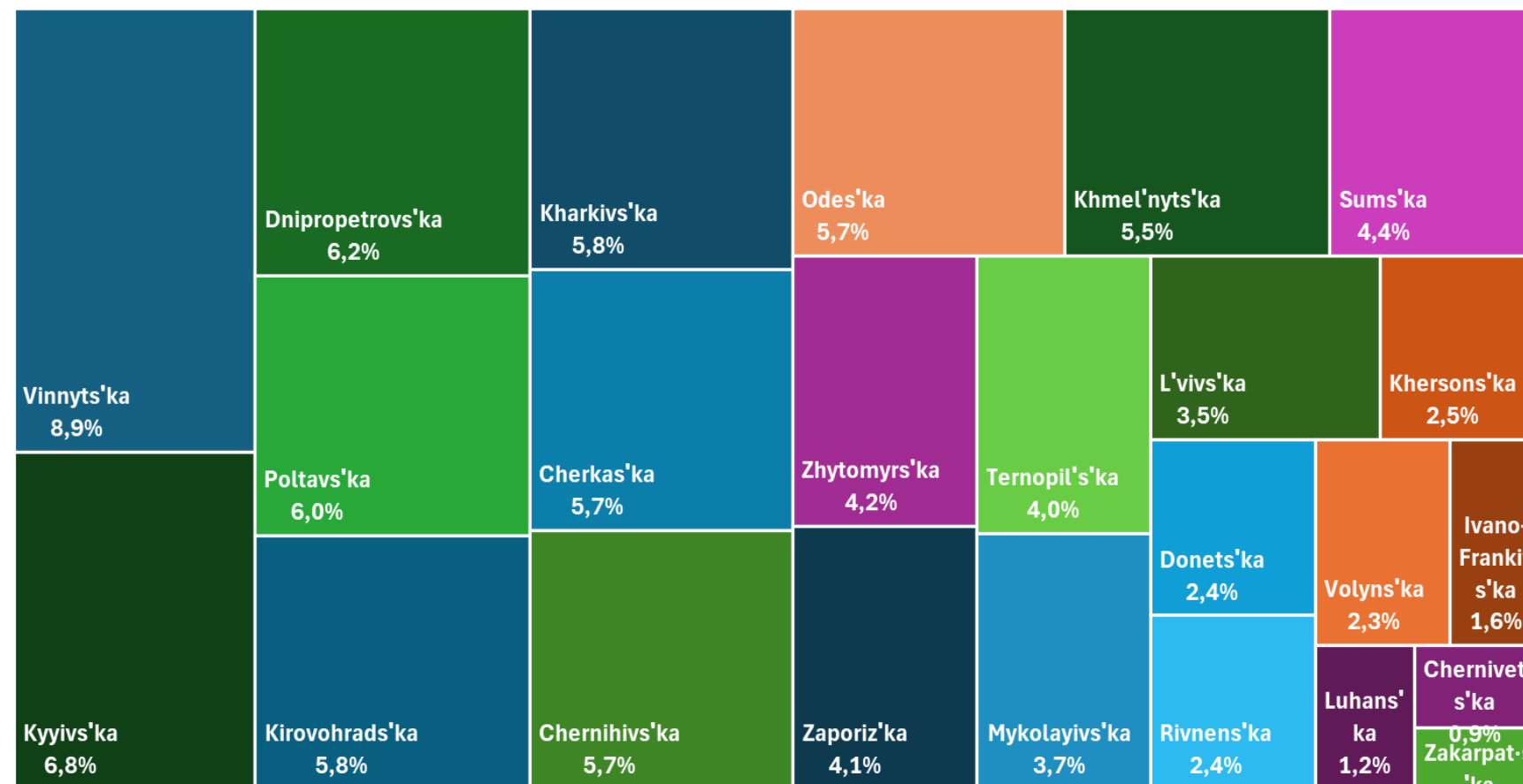
АНАЕРОБНЕ ЗБРОДЖУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ

Спільне зброджування мікроводоростей (C/N <10) поживними рештками (для соломи C/N >70) отримати оптимальний субстрат для анаеробного зброджування (C/N = 15-30). Це також зменшує потребу в зневодненні мікроводоростей.

Ми можемо досягти оптимальної концентрації CP = 10-12% в результаті змішування соломи (CP = 80%) та мікроводоростей (CP = 1-5 %)

Принцип розподілу по регіонах: пропорційно існуючому потенціалу виробництва біометану на біогазових заводах.

Енергетичний та економічний сенс: максимальне використання сонячної енергії та мінімальне споживання електро- і теплової енергії з інших джерел.



Регіональний розподіл потенціалу виробництва біометану з МВ, вирощеної з використанням CO₂, отриманого в результаті збагачення біометану

Біометановий потенціал в Україні з мікроводоростей

- **Теоретичний потенціал біометану з мікроводоростей : $\approx 4,37$ млрд Nm³ CH₄/рік.**
- **Економічно досяжний потенціал: 673–800 млн Nm³ CH₄/рік, що складає 3,8 % від національного біометанового потенціалу.**
- Потенціал враховує вирощування мікроводоростей на CO₂ після збагачення біогазу та поживних речовинах дигестату
- **Обмежувальний фактор: доступність CO₂**
- Можливість зменшення викидів CO₂ та додаткового виробництва біомаси

CASE STUDY : ДЕМОНСТРАЦІЙНИЙ ЦЕНТР ALGAEBIOGAS (СЛОВЕНІЯ)



Main pond with paddlewheel



Демонстраційний центр складається з двох ставків для водоростей (основний ставок площею 100 м² та інокуляційний ставок площею 10 м²), розташованих у теплиці для забезпечення оптимальних умов роботи та зменшення сезонних коливань. Дигестат із біогазової установки подається в основний ставок.

Проект AlgaeBioGas демонструє високий рівень інтеграції технологій біогазових установок і біоремедіації з використанням мікроводоростей, забезпечуючи:

- глибоке очищення дигестату,
- утворення додаткової біомаси,
- значне скорочення викидів CO₂ (1 100 т CO₂/рік),
- економію землі для вирощування кормових культур — 9–27 гектарів (замість 335 гектарів, необхідних для силосу).

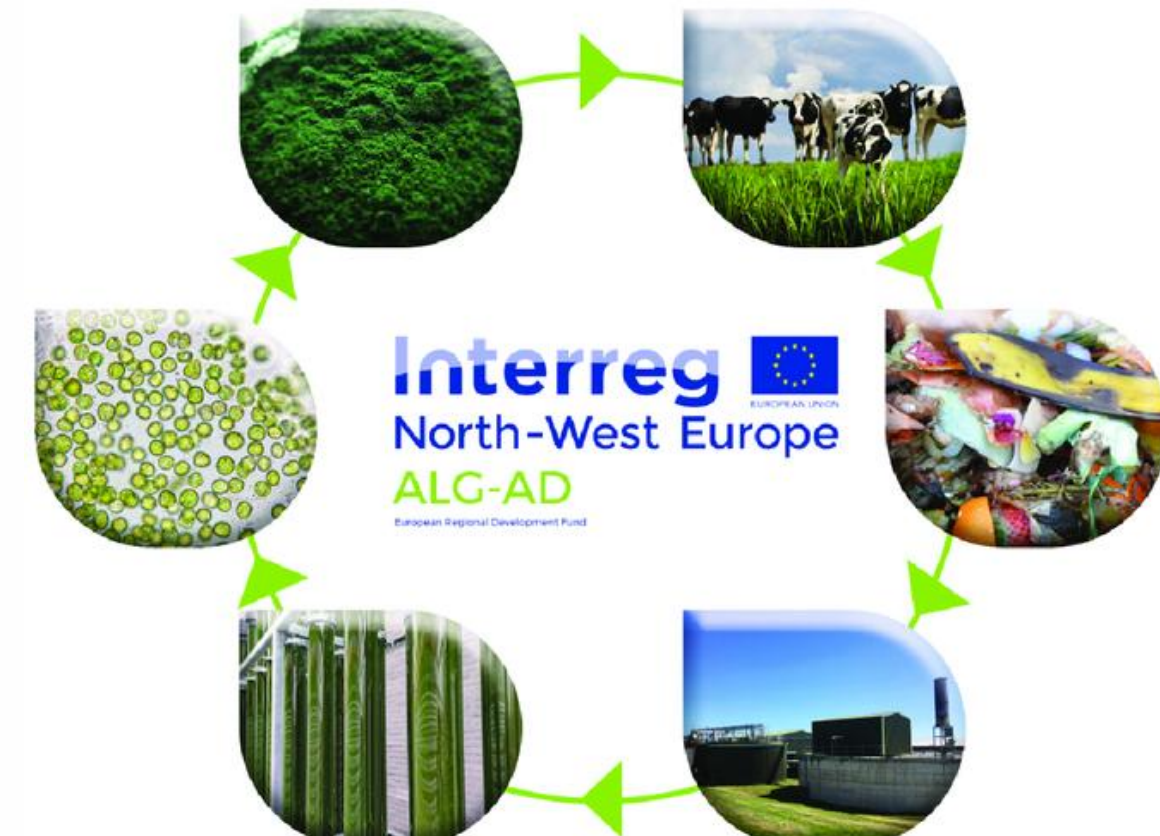
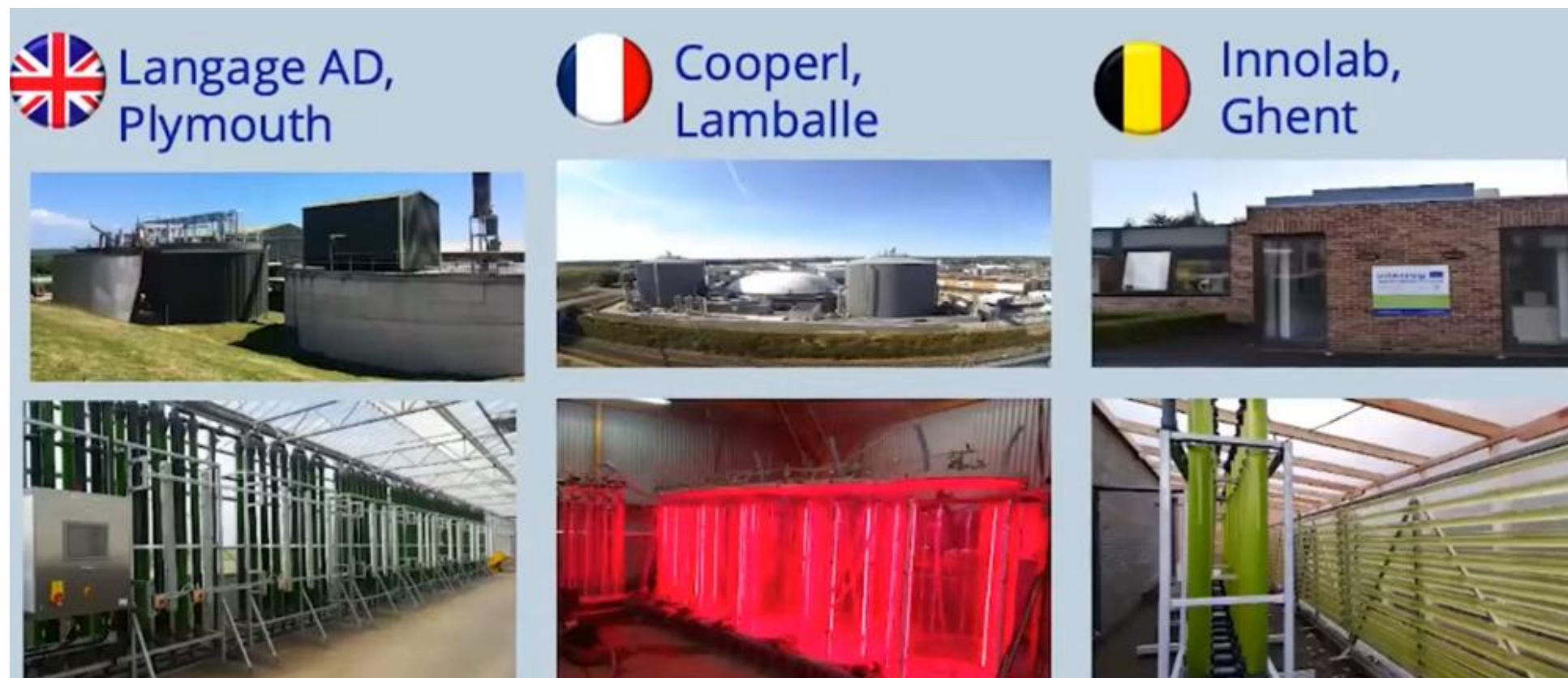
ALG-AD Велика Британія, Франція, Бельгія

Проект ALG-AD реалізовувався в рамках програми Interreg North-West Europe з метою інтеграції систем анаеробного зброджування (AD) із культивуванням мікроводоростей.

- Основним завданням було знайти ефективне рішення для **переробки надлишкового дигестату**, збагаченого поживними речовинами, **який не можна вносити на поля як добриво через екологічні обмеження в ЄС.**

Проект реалізували на трьох пілотних майданчиках: Велика Британія (Суонсі), Франція (Бретань), Бельгія (Фландрія).

- На цих майданчиках використовували різні типи субстратів для анаеробного зброджування (харчові та сільськогосподарські відходи), а також різні конфігурації фотобіореакторів для оцінки ефективності культивування водоростей на попередньо обробленому дигестаті.



ALL-GAS ВЕЛИКОМАСШТАБНЕ ВИРОБНИЦТВО БІОПАЛИВА З МІКРОВОДОРОСТЕЙ (ІСПАНІЯ)

Проект реалізовано в муніципалітеті Чиклана-де-ла-Фронтера (Іспанія) на території діючої станції очищення стічних вод.

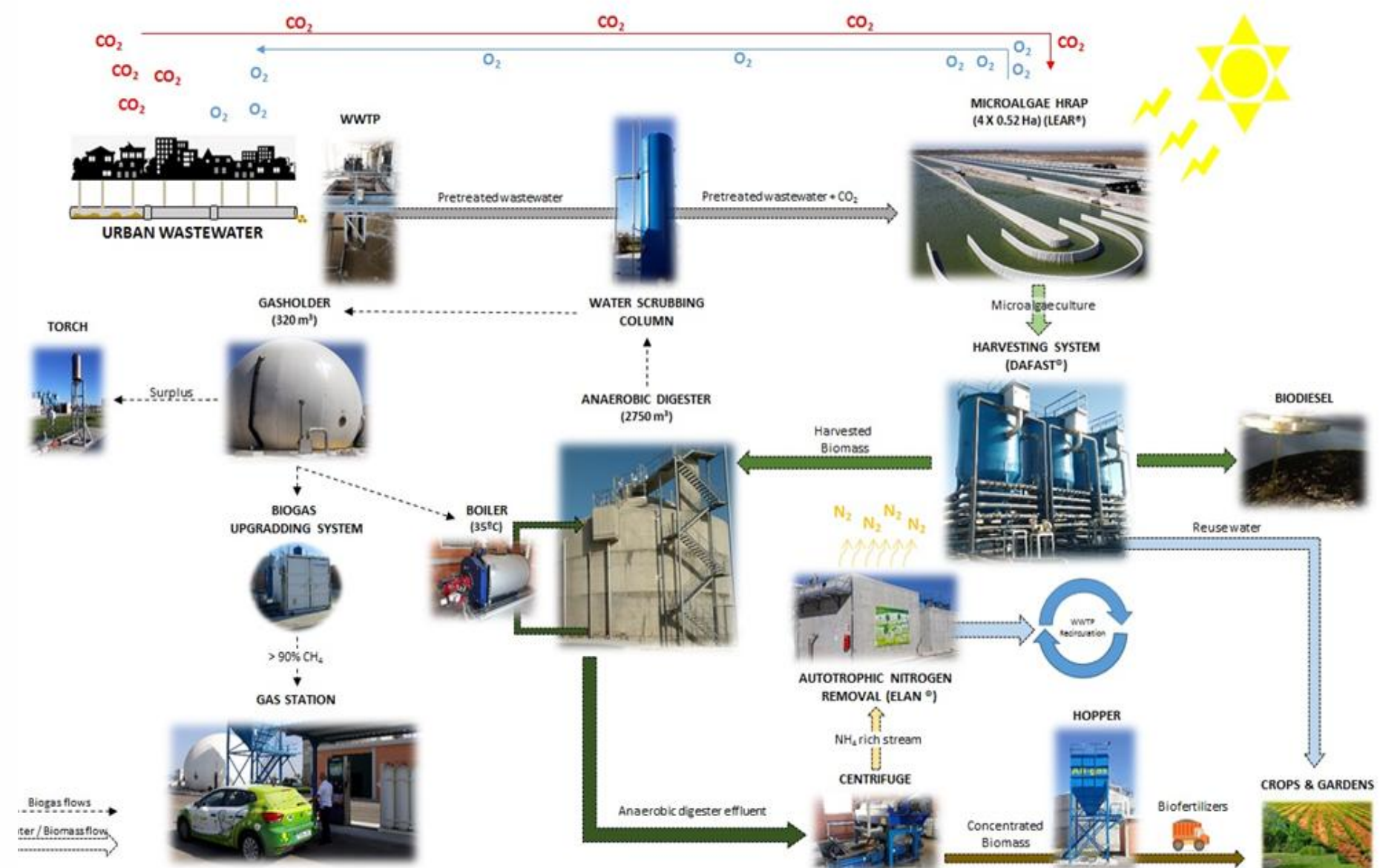
ALL-GAS (Іспанія) – **перший у світі приклад повномасштабного застосування мікроводоростей для виробництва біопалива на основі очищення стічних вод.**

Технологія ALL-GAS включає :

- подачу стічних вод зі станції очищення у відкриті ставки/канали (до 4 га);
- культивування мікроводоростей у воді, збагаченій органічними речовинами, азотом і фосфором.

Переробка біомаси:

- ліпідна фракція → трансестерифікація → біодизель;
- залишки та активний мул → анаеробне зброджування → біогаз + CO₂;
- очищення та компресія біогазу → паливо для транспорту.



ВИРОБНИЦТВА ПЕРЕДОВОГО БІОМЕТАНУ З МІКРОВОДОРОСТЕЙ, ВИРОЩЕНИХ НА ДИГЕСТАТІ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК Україна, 2024-2026 рр.

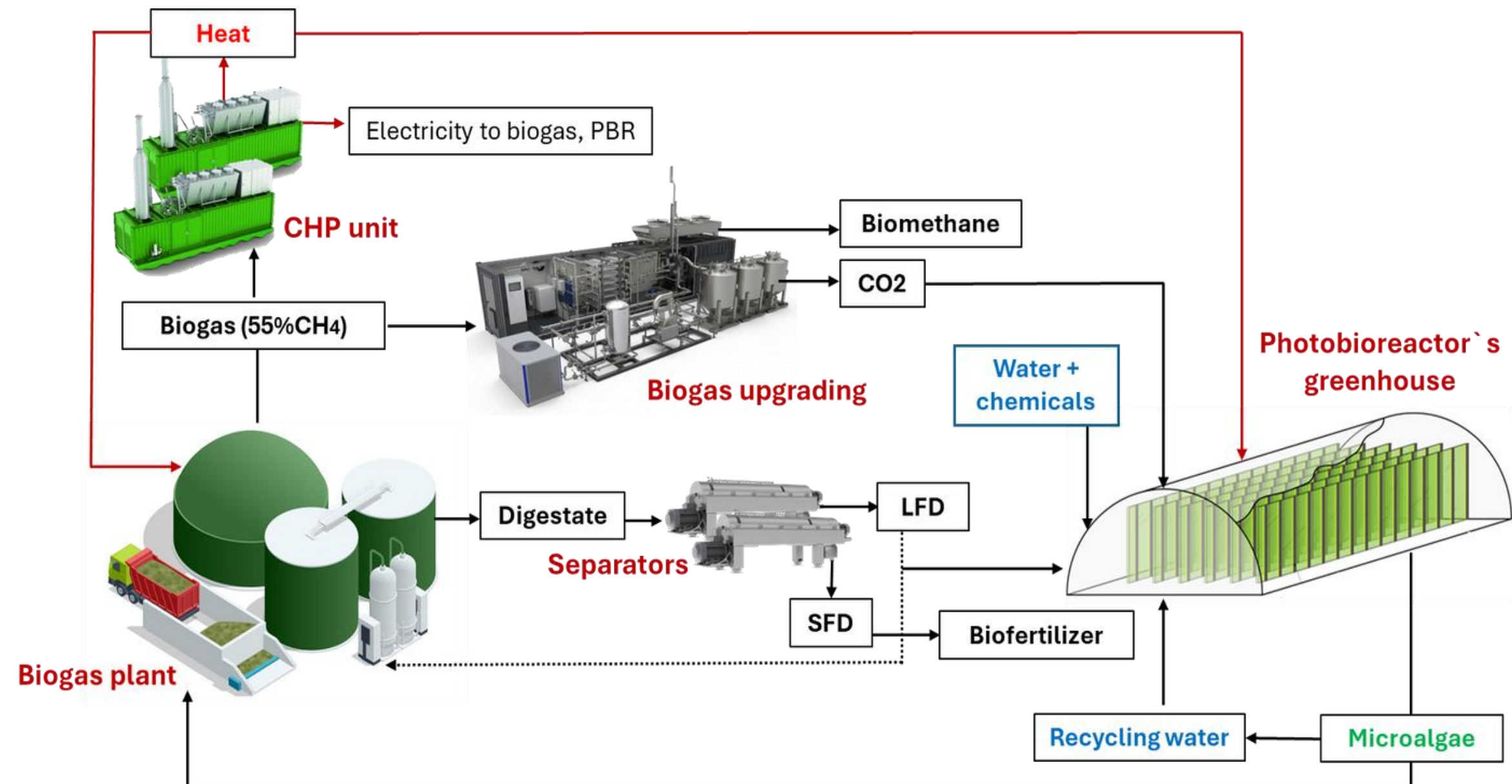
Проект поєднуватиме експерименти від лабораторних до пілотних масштабів, включаючи культивування мікробіодоростей у плоскостельних та трубчастих фотобіореакторах, з новими обчислювальними моделями для культивування мікробіодоростей та анаеробного зброджування, для оптимізації процесів та техніко-економічного аналізу.

Project Partners:



Innovate
UK

UABIO



Innovate Ukraine : ЛАБОРАТОРНА СТАДІЯ 2025 р

UABIO



Плоско-панельний
фотобіореактор з полікарбонату



Chlorella
10 g/L



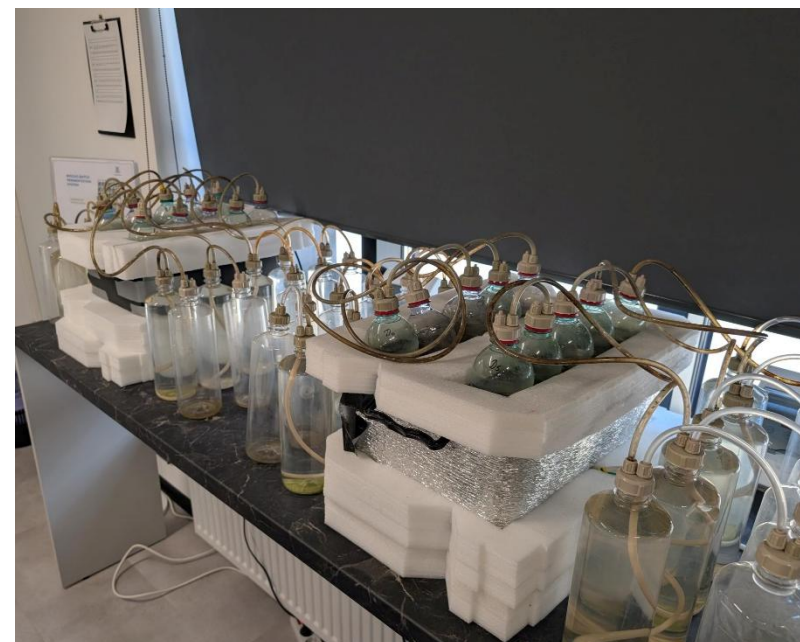
Плоский
фотобіореактор



Трубний
фотобіореактор



AD БАТЧ-ТЕСТИ



ВИСНОВКИ



- Мікроводорості перелічені в Додатку IX-A Директиви ЄС RED II як стала сировина для передового біопалива, що підлягає подвійному заліку.
- Вони пропонують високу продуктивність біомаси, уловлювання CO₂ та рециркуляцію поживних речовин — ідеально підходять для інтеграції з анаеробним зброджуванням, та використовують дигестат як середовище для росту.
- Спільне зброджування вологих водоростей із сухими сільськогосподарськими залишками, такими як солома (для балансування C/N), забезпечує оптимальні умови для анаеробного процесу розкладання. Оскільки виробництво біогазу шляхом мокрого бродіння не вимагає сушіння біомаси.
- Мікроводорості можуть перетворювати сонячне світло на хімічну енергію з високою ефективністю фотосинтезу (6%–8%) порівняно з наземною біомасою (1,8%–2,2%).
- В Світі та Україні вже реалізуються міжнародні проєкти, що підтверджують технічну й економічну доцільність цієї технології. Це відкриває нові можливості для розвитку зеленої енергетики, підвищення енергонезалежності та покращення екології.
- Проєкт Innovate Ukraine підкреслює, що Україна вже займається новаторськими дослідженнями щодо використання дигестату та мікроводоростей для сталого виробництва біометану у співпраці з провідними установами Великої Британії та за підтримки міжнародного фінансування.

UABIO

Дякую за увагу!

Біоенергетична асоціація України
uabio.org

e-mail: hyvel@secbiomass.com